



TITLE:

<高校生のページ>熱から生じる光
を自在に操る

AUTHOR(S):

浅野, 卓; 井上, 卓也; デゾイサ, メーナカ; 野田, 進

CITATION:

浅野, 卓 ...[et al]. <高校生のページ>熱から生じる光を自在に操る. Cue
2018, 39: 55-58

ISSUE DATE:

2018-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/235640>

RIGHT:

高校生のページ

熱から生じる光を自在に操る

工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 光量子電子工学分野
浅野 卓、井上 卓也、メーナカ デゾイサ、野田 進

はじめに

みなさんも物体を高温に加熱すると、そこから光が発生することを知っていると思います。太陽光、白熱電球の光、加熱された炭が赤く光る現象など、日常的に目にしたり、利用したりしていますね。これを熱輻射といいます。そもそも温度が高い状態というのは、ご存じのように、分子や原子、電子などの物質を構成する粒子が激しく無秩序に運動している状態のことを指します。そのため、触ると粒子の無秩序運動のエネルギーが伝わってやけどをしたりするわけですが、運動しているものが電子などのように電荷をもっている場合はさらに興味深いことが起こります。それは電荷をもった粒子（荷電粒子）が加減速運動をすると、そこから電磁波（光）が生じることです。これはコイルに交流電流を流すと電磁波が発生する現象から考えてもらうとわかりやすいです。コイルなどで、交流電流を流すと磁場が変化しますが、磁場が変化すると電場の変化が生じ、それらの一部が互いに影響し合いながら空間を伝わっていく、すなわち電磁波が発生します。そして荷電粒子の流れが電流ですので、これが加減速運動すると同じように交流電流が流れ、電磁波が発生することになります。ここで、高温物質中の電子は無秩序に動いていますので、速度が素早く変化するときもあればゆっくり変化するときもあり、その結果、様々な周波数の電磁波を放出します（図1）。ただ、基本的には温度が高い方が、素早く動く電子の割合が大きく、その結果、高い周波数、すなわち波長の短い電磁波が放出されます。このため6000℃程度と高い温度の太陽からは可視光線が多く放出され、もっと温度の低い物体、たとえばサウナのヒーターなどからは可視光線ではなくて目に見えない遠赤外線が多く放出されます。そして、どんな物質でも電子などの荷電粒子を含んでいますので、基本的にはどんな物質でも加熱すれば電磁波を発生するようになります。これが熱輻射現象です。

熱輻射現象では様々な波長の光や電磁波が発生しますが、たとえば地球上の生命は太陽からやって来るそのような光の一部を使って、ものを見分けたり、光合成したりしています。また太陽電池では太陽光を電気エネルギーに変換していますが、効率よく変換が出来るのは実はその一部の波長成分だけです。白熱球は照明に使われていますが、目に見えない赤外線も放出しています。赤外線領域でも、熱輻射光源は二酸化炭素や窒素酸化物等々の化学物質を検出するための光源として用いられていますが、検出し

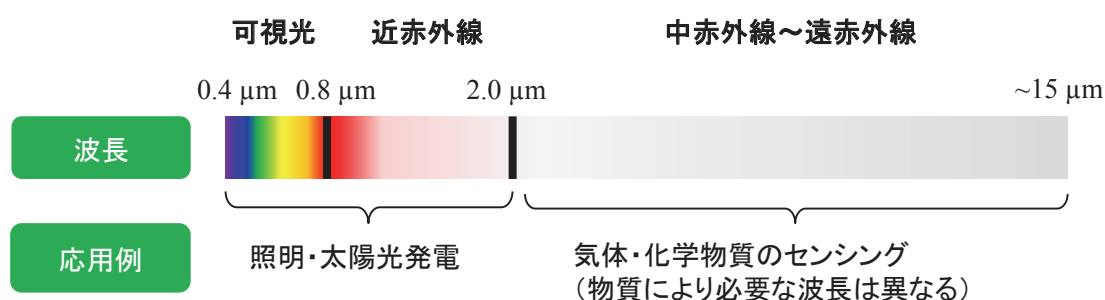


図1 熱輻射に含まれる各波長の光の応用例

たい物質に吸収されない波長の光も沢山発生させてしまいます。つまり、一般的な物質から生じる熱輻射は、強弱はあるものの、あらゆる波長の光を同時に放射してしまうため、特定の波長の光のみが必要とされる状況では、エネルギーの無駄が大きいということです。そこで私たちの研究室では、望む波長の熱輻射を、望むタイミングで、高効率に生成する手法や、すでに発生した熱輻射を望む波長に変換する手法などを確立して、応用へと展開することを目指して研究を進めています。このようなことができれば、例えば効率の良い太陽光発電や、超低消費電力な二酸化炭素センサーや排気ガスセンサー、効率が良い照明など、様々な画期的な機器やシステムが実現できるようになります。

熱輻射の起源となる電子と光の相互作用を制御する

先ほど説明したように、熱輻射の起源は高温の物体の中で動く電子などの荷電粒子です。基本的にはその動きが無秩序であるために、様々な周波数の電磁波が放射されるわけですので、熱輻射が特定の周波数付近でのみ生じるようにするには、荷電粒子の熱運動を制御する必要があります。そのような制御を行うために、私たちが注目したのは共鳴現象です。ここで、リコーダーのような笛を想像してみてください。その管の中では、特定の周波数において音の定在波が生じる、すなわち共鳴現象が生じます。これを利用すると、空気の流れから発生した様々な周波数を含む音の中から、特定の周波数の音を増強し、かつその他の周波数の音を抑制して、目的の音色を出すことが出来ます。実は電子もミクロなレベルでは波の性質を持っていますので、ナノメートルスケールの管や板や箱のようなものをうまく作ると、電子の動きが特定の周波数に共鳴するようにすることができます。これによって、元々はまったく無秩序な熱運動だったものを、特定の周波数の成分が多く、他の周波数の成分が小さいものに制御することが出来ました。さらに、私たちは光の共鳴も利用することにしました。光は波ですので、その波長の寸法、すなわちマイクロメートルスケールの管や板や箱のようなものを作れば、特定の周波数の光が共鳴する構造体を実現できます。ここでナノメートルスケールの電子共鳴構造と、マイクロメートルスケールの光共鳴構造の両者の共鳴周波数を一致させておくと、電子が特定の周波数を中心に熱運動し、そこから出た光が光共鳴構造に共鳴し、その光が今度は電子に吸収され、また電子が光を放出し、といった相互作用が繰り返され、最終的にはこの共鳴周波数を中心に光が放出されます。その結果、電子は熱エネルギーを失って若干温度が下がりますが、周りには熱運動している原子（上記の構造体を形成している物質の原子）が沢山いますので、その原子と衝突し合ってまた熱エネルギーをもらいます。また原子には熱伝導等で外から熱エネルギーを与えることが出来ます。その結果、この構造体では、外から（無秩序な）熱エネルギーを供給すれば、特定の周波数（構造体の共鳴周波数）付近の光に変換されて出てくるといふ作用が生じると期待できます。

上記のような作用を実証した例を図2に示します。ここでポイントとなるのが、ヒ化ガリウム、窒化ガリウムなどの半導体でできた電子の波のスケール（ナノメートルスケール）の層状の電子共鳴構造（これを「量子井戸」と呼びます）と、それを光の波のスケール（マイクロメートルスケール）に加工して作製される光の共鳴構造（これを「フォトニッ

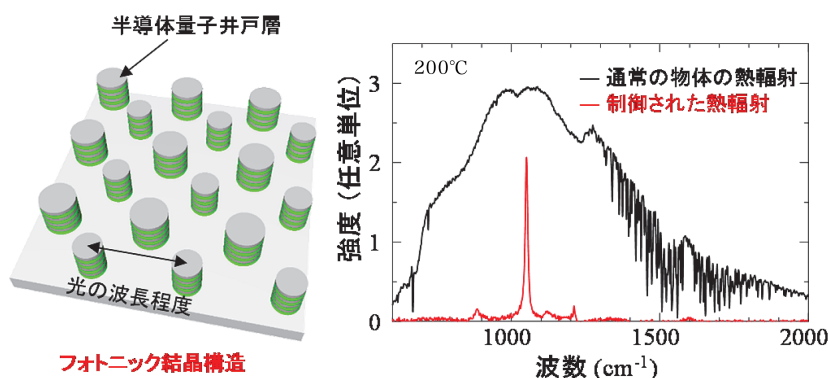


図2 半導体フォトニック結晶を用いた熱輻射光源の模式図（左）と実現した狭帯域な熱輻射スペクトルの例（右）

ク結晶」と呼びます)が複合した電子・光同時共鳴構造体(図2左)です。図2の右を見て頂くと分かるように、赤線で表されたこの構造体からの熱輻射が、通常の物体からの熱輻射と比較して非常に狭い帯域だけで生じています。測定はどちらの物体も200℃に加熱した状態で行っています。しかし主要な熱輻射が生じている帯域の幅を比べると、赤線のものは黒線のものの1/100以下です。ピーク強度は赤線のものが若干低いですが、それほど変わりません。ここで温度を一定に保つには、光を放射した分だけエネルギーを外部から投入しないといけないことに注意すると、この結果から、赤線の熱輻射を示す物体は、黒線のそれと比較して1/100程度のエネルギー消費でこの波形の熱輻射を発生できるということが言えます。実際には、熱伝導等のエネルギー損失もあり、これらは両者で同程度ですので、今回の実験では、前者のエネルギー消費は後者の1/13程度でした。いずれにせよ、赤線の波形が最大となっている波長の光しか使わない応用では、この電子と光の共鳴構造を用いれば通常の物体と比較して大幅に少ないエネルギーで、同程度の強度の光を発生できるということが実証されました。このような発光体は、特定の波長の赤外線を吸収するガスの濃度をその光吸収損失から計測するセンサーの低消費電力化などへの応用が期待されます。例えば排気ガスに含まれる有害物質や大気中の二酸化炭素濃度の計測などです。

「熱輻射の応答は遅い」という常識を覆す

さらに研究を進めていくうちに、最近、新たな熱輻射制御の可能性も見えてきました。それは、「熱輻射を高速に制御する」というものです。一般に、高温物体の熱輻射強度は、その物体の温度で決まるため、熱輻射のオン・オフを行うためには物体を加熱・冷却する必要がある、その応答速度は極めて遅いというのが常識的な理解でした。しかし、私たちは上で述べた研究を進めてゆくうちに、この共鳴構造に電子を出し入れすることができれば、それだけで熱輻射をオン・オフできるのではないかという発想を得ました。物質中の電子は電圧を加えて動かすことが出来ますので、ナノメートルスケールの構造から電子を引っ張り出したり、また戻したりすることは可能です。これができれば、構造体の温度(=構成原子の熱運動)は変わらなくても、光発生の大本である電子の共鳴状態がオン・オフされるわけですから、熱輻射の強度もそれに従うと予想されます。実際に、上で述べた「量子井戸」の中の電子の密度を、外部から加える電圧によって変化させることのできる光源を作製したところ、光源の温度は一定であるにも関わらず、電圧に応じてその熱輻射強度が通常の熱輻射光源よりも4桁程度速く変化する様子が確認されました(図3)。また異なる波長の熱輻射を発生する構造を複数個用意して、これらを電氣的に制御することで、波長を高速に切り替えることのできる光源の実証にも成功しています。こうした熱輻射の高速な

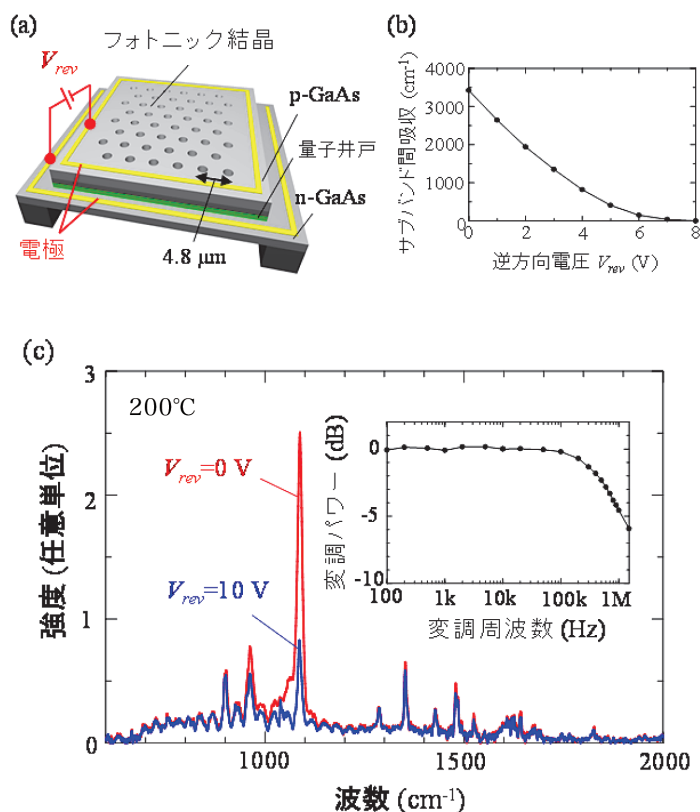


図3：熱輻射強度の電気制御

制御は、上で述べたようなガスセンシング装置の小型軽量化において非常に重要です。また、従来観測できなかった新しい高温物理現象の発見につながる可能性もあり、大変興味深いと考えています。

熱輻射制御の発電応用

太陽電池が効率よく電気に変換できるのは赤色のすぐ外側にある目には見えない近赤外線の光です。太陽からは大量の可視光線や熱（赤外線）がやってきますが、そのままでは発電効率が低くなってしまいます。ただしこれらの光も、物体に吸収させれば熱エネルギーに戻すことができますので、その熱エネルギーから新たに太陽電池に適した波長に制御された熱輻射を発生させれば、これは太陽電池で効率よく電気に変換できる光になります。

このような用途ではガスセンサーなどと比較して波長の短い光が必要になり、それに応じてより高温で動作する熱輻射光源が必要になります。様々な計算を行うと 1000℃ 以上の高温動作が可能なが望ましいと分かり、私たちはそのような条件を満たすべく図 4 に示すような、半導体材料であるシリコンを半径 100 ナノメートルの円柱を並べたような構造を設計・作製し、熱エネルギーを太陽電池が発電しやすい可視光線と近赤外線の境界付近の光に変換して放射させることに成功しました。

この技術によって、太陽の光だけでなく色々な熱エネルギーも太陽電池で効率よく使えるようになります。実用化すれば、太陽電池のエネルギー変換効率を現在の 2 倍の 40% 以上にまで高めることが期待できます。また、太陽の熱だけでなく、工場の排熱などあらゆる熱を光に変換すれば、エネルギーの有効利用が進みます。

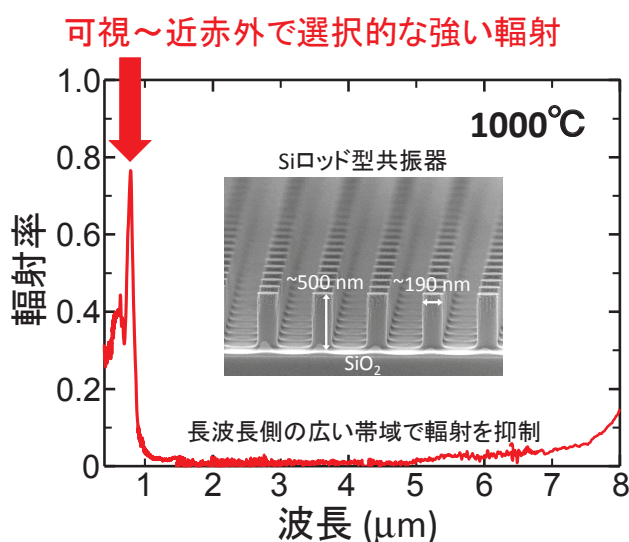


図 4：熱光発電用熱輻射光源

最後に

これまでの私たちの研究を通して、「エネルギーの無駄が大きく、応答速度も極めて遅い」と一般に考えられてきた高温物体の熱輻射が、特定の波長に集約可能で、高速な制御も行うことができる奥の深い発光現象であることが明らかになってきました。今後は、こうした熱輻射が有する面白い可能性をさらに探求するために、新しい半導体材料や微細光学構造の設計・作製を行い、可視光から赤外線までの任意の波長において、自在な熱輻射の制御を実現していきたいと考えています。最終的には、特定の波長に集中した熱輻射を利用して、太陽電池のエネルギー変換効率の大幅な向上や、環境や医療用センサーシステムの小型化・低消費電力化を実現し、持続可能な社会の構築に貢献できればと考えています。